

SwissFEL 向け C バンド導波管の製造

MANUFACTURE OF C-BAND WAVEGUIDE NETWORK FOR SwissFEL

木村優志^{#, A)}, 重岡伸之^{A)}, 三浦禎雄^{A)}
Masashi Kimura^{#, A)}, Nobuyuki Shigeoka^{A)}, Sadao Miura^{A)},
^{A)} Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

Abstract

A free electron laser facility, SwissFEL, is under construction to aim at routine operation in 2017 by Paul Scherrer Institut (PSI). Mitsubishi Heavy Industries (MHI) has accepted order of one C-band waveguide network prototype (CWNP) for SwissFEL project in June 2014 and has been already delivered to PSI in December 2014. A C-band waveguide network connects the klystron to the four inputs of the accelerating structures. The CWNP has already installed in the test facility and high power test of it is planned by PSI. MHI also has accepted order of 26 C-band network series (CWNS) and the production of them have been started. We report the properties and the low-level RF test results for the CWNP.

1. はじめに

現在、スイスの Paul Scherrer Institut (PSI)が中心となり、2017 年のユーザー運転開始を目指して自由電子レーザー施設 SwissFEL [1]の建設が進められている。量産計画に先立ち、2014 年 6 月、三菱重工は SwissFEL 向けの C バンド導波管プロトタイプ 1 ユニット(導波管 21 本)を PSI から受注し、同年 12 月に納入完了した。さらに導波管プロトタイプに引き続き、実機 26 ユニット(導波管 494 本)を 2014 年 11 月に受注し製造を行っている。

本発表では、SwissFEL 向け C バンド導波管の仕様、設計・製作、出荷前検査における LLRF 測定結果等について報告する。

2. SwissFEL 向け C バンド導波管の仕様

SwissFEL 向け C バンド導波管 1 ユニットの全体図を

Figure 1に示す。導波管 1 ユニットは、RF をクライストロンからパルスコンプレッサ[2]へと送る導波管 (vertical waveguide)とパルスコンプレッサから加速管 4 本へと RF を分配する導波管 (horizontal waveguide)から構成され、直線、ベンド形状の導波管の他、RF を二等分割するスプリッタや RF モニター用の方向性結合器、真空引口付導波管が含まれる(Table 1)。また、加速管との取り合いフランジの位置にはビーム軸方向で $\pm 0.2 \text{ mm}$ の寸法精度が求められる。Table 2に SwissFEL 向け C バンド導波管の要求仕様を示す。

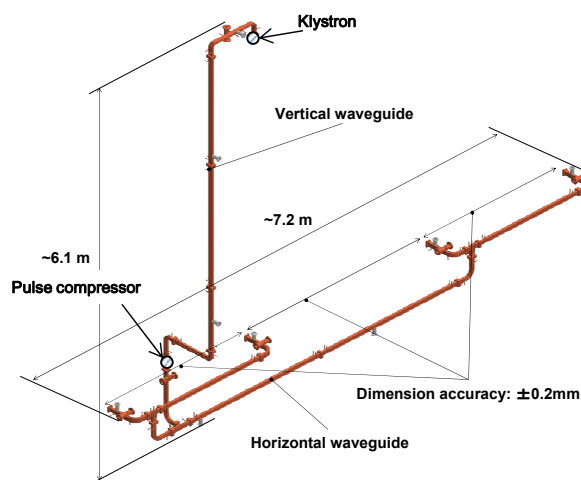


Figure 1: Overview of the waveguide network (series production for LINAC 1).

Table 1: Components Shape of the Waveguide Network (series production)

Components shape	Number of the components		
	LINAC1	LINAC2	LINAC3
Straight sections	7	7	5
Bending sections (sweep type)	7	7	7
Bending sections (miter type)	3	3	3
Splitters	3	3	3
Vacuum ports	9	9	9
Bidirectional couplers	6	6	6

[#] masashi2_kimura@mhi.co.jp

Table 2: Requirements Specification

Bandwidth	5712 ± 20 MHz
Peak power	320 MW*
Average power	15 kW
Pulse repetition rate	1-100 Hz
VSWR	< 1.04
Operating pressure	< 1 × 10 ⁻⁶ Pa
Waveguide size	WR187
Flange type	C-band A-DESY
Coupling of the RF monitor	-60 ± 2 dB (5712 ± 3 MHz)
Directivity of the RF monitor	> 25 dB (5712 ± 20 MHz)
RF symmetry error of splitters	< 0.1 dB in amplitude < 3° in phase
RF leak to vacuum manifold	< -85 dB
Residual gas analysis (RGA)	The RGA spectrum must show no evidence of hydrocarbons and the peaks > 40 Amu (excluding peak 44) should be ≤ 0.1%
Outgassing rate	< 1.0 × 10 Pa · m ³ /(s · m ²)

*Maximum power in between the pulse compressor and the 1st splitter

3. 設計・製作

客先仕様を満たす導波管形状を決定するため、高周波 3 次元電磁界解析ソフトウェア ANSYS HFSS 15.0 を用いて RF 解析を行った。解析対象とした導波管はコーナー形状、スプリッタ、方向性結合器、真空引口付導波管である。PSI が設計したデザインをもとに、解析対象導波管の寸法を振りながら RF 特性(VSWR、結合度、方向性、RF 対称性の誤差等)を計算し、要求性能を満たす寸法および公差を決定した。真空引口に関しては、導波管から真空引口への RF リークが仕様を満たすような RF 形状を当社で設計した。その後、上記の内容を踏まえて機械設計を実施した。

直線およびコーナー形状の導波管は引抜管から加工し、バンド形状およびスプリッタは板材から加工した。加工後、表面処理を実施し酸化被膜・油分等を除去し、導波管本体、真空引口、フランジ、冷却管等を組立てた。その後、国内最大級の真空ろう付炉(対応最大ワーク：直径 1.3 m×高さ 3.4 m)でろう付を実施し、導波管の寸法計測、リーク試験、RF 試験等を経て製品を完成させた。Figure 2に例として完成後の E ベンドを示す。



Figure 2: Completed E bend.

4. 導波管プロトタイプにおける Low-level RF 試験結果

出荷前に Low-level RF 試験を行い、製作したプロトタイプ導波管の RF 特性を確認した。以下に VSWR、RF モニターの結合度・方向性、スプリッタの RF 対称精度の測定結果を示す。

4.1 VSWR

導波管プロトタイプ全 21 本において VSWR 測定を行った。21 本全ての導波管において仕様値 VSWR < 1.04 を満足した(平均 1.016)。

4.2 RF モニターの結合度・方向性

導波管 1 ユニットには 6 つの RF モニターが含まれる。Figure 3に RF モニターの概略図を示す。RF 入口を port 1、出口を port 2、進行波の副導波管での出口を port 3、反射波の副導波管での出口を port 4 とした。port 1 から port 3 に透過する RF 信号を S31、port 2 から port 3 に透過する RF 信号を S32 とすると、結合度(coupling)は S31、方向性(directionality)は S31-S32 となる。Figure 4にプロトタイプ導波管における RF モニターの結合度と方向性 (@5712 MHz)を示す。測定時には VSWR < 1.02 のダミーロードを使用した。モニター全数の結合度・方向性ともに仕様値に収まった。

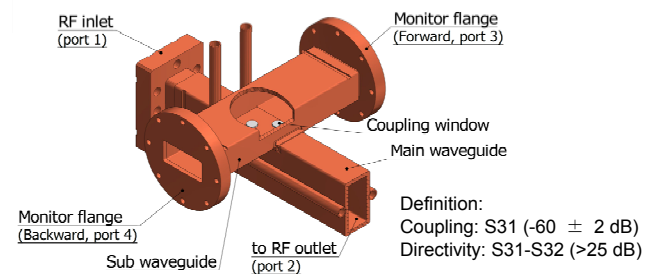


Figure 3: Schematic of RF monitor.

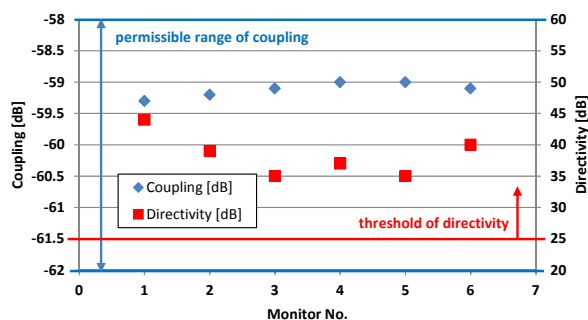


Figure 4: Coupling and directivity of RF monitor.

4.3 スプリッタの RF 対称精度

導波管 1 ユニットには E スプリッタ 1 つと H スプリッタ 2 つが含まれる。Figure 5 に H スプリッタの概略図を示す。RF 入口を port1、RF 出口 1 を port 2、RF 出口 2 を port 3 とし、port 2 での RF 出力の位相を ω_2 、port 3 での RF 出力の位相を ω_3 とすると、RF 振幅の対称性の誤差は $|S21-S31|$ 、RF 位相の対称性の誤差は $|\omega_2 - \omega_3|$ となる。Figure 6 に E スプリッタ および H スプリッタの RF 対称性の誤差 (@5712 MHz) を示す。スプリッタ全数において仕様値 ($|S21-S31| < 0.1$ dB、 $|\omega_2 - \omega_3| < 3^\circ$) に収まる結果となった。

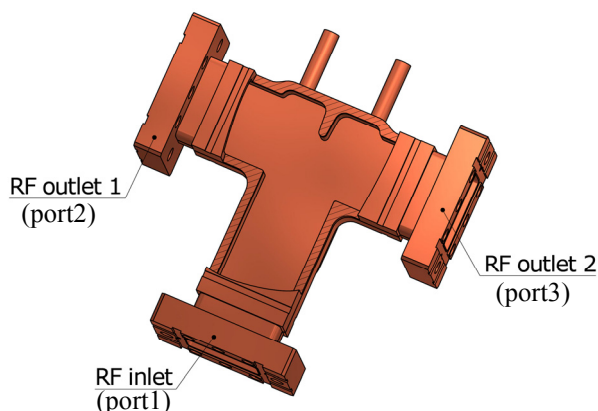


Figure 5: Schematic of H-plane splitter.

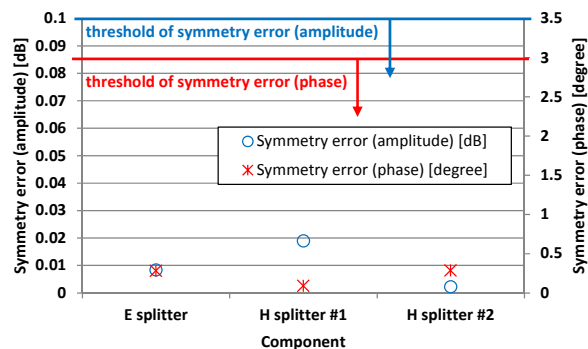


Figure 6: Symmetry error of splitters.

5. 残留ガス分析および放出ガス測定

導波管 1 ユニットの 3 分割の立体回路に組立てて、

残留ガス分析およびビルドアップ法による放出ガス測定を実施した。Figure 7 にクライストロン側の導波管 (vertical waveguide) の残留ガス分析結果を示す。加工油や溶剤などに起因する有害なガスは検出されなかった。

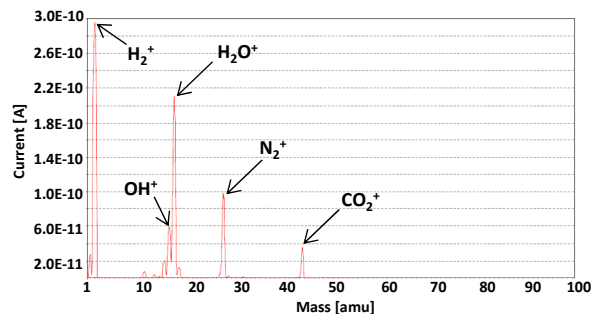


Figure 7: Residual gas analysis of the vertical waveguide.

Figure 8 にクライストロン側の導波管および加速管側の導波管 (horizontal waveguide) のガス放出量を示す。3 分割した立体回路全てが仕様値を満足した。

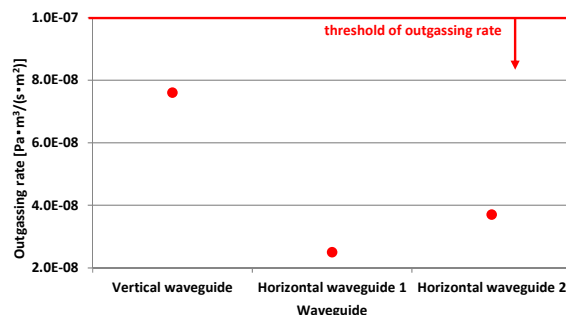


Figure 8: Outgassing rate.

6. ビーム軸方向寸法精度

PSI 仕様では、加速管との取り付けフランジの位置にはビーム軸方向で ± 0.2 mm の寸法精度が求められる。そこで、Figure 9 に示すように、予め導波管の間にスペーサーフランジを挿入する設計とし、各導波管の寸法測定後に、組立後の寸法が仕様を満たすようスペーサーフランジの厚みを逆算した。

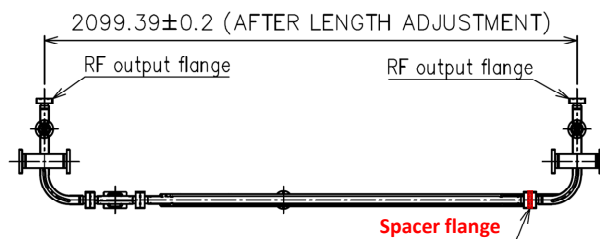


Figure 9: Dimensional adjustment using spacer flange.

7. まとめ

Cバンド導波管プロトタイプ(導波管 21 本)を製作した。RF 特性、寸法精度、残留ガス分析・放出ガスの要求仕様を満たし、PSI に全数納入完了した。PSI により、製作した C バンド導波管プロトタイプがテストベンチに据え付けられ(Figure 10)、今後ハイパワーテストが実施される予定である。現在、導波管プロトタイプに引き続き受注した実機 26 ユニット(導波管 494 本)を製造中である。

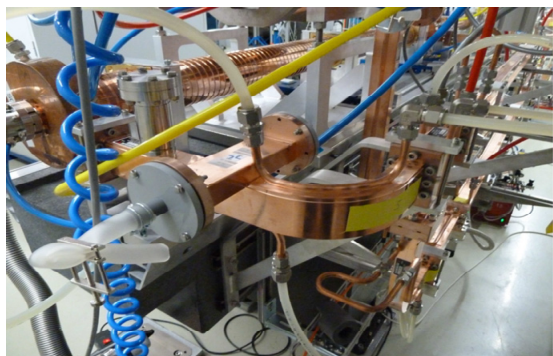


Figure 10: Horizontal waveguide installed in the PSI test facility.

参考文献

- [1] F. Loehl et al., “Status of the SwissFEL C-band Linac”, in Proceedings of 36th International Free Electron Conf., Basel, 2014, 322.
- [2] R. Zennaro et al., “C-band RF pulse compressor for SwissFEL”, in Proc. Of the IPAC 2013 Conf., Shanghai, China, 2013, pp. 2827-2829.